DOI:10.13866/j.azr.2024.03.14

基于PLUS和InVEST模型的乌鲁木齐市碳储量时空演变与预测

李佳珂， 邵战林

（新疆农业大学公共管理学院，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：土地利用变化对陆地生态系统的碳储量变化有着重要影响，研究不同发展情景下陆地生态系用碳储量变化情况，有利于优化空间布局，协调土地利用与生态环境保护的关系。本研究结合PLUS和InVEST模型，通过多种驱动因素数据分析了2000—2020年乌鲁木齐市土地利用的变化特征，以此预测模拟2030年自然发展情景、生态保护优先情景和耕地保护优先情景下土地碳储量。结果表明：（1）2000—2020年乌鲁木齐市林地、水域、建设面积、未利用地数量增加，耕地、草地面积减少。（2）2030年，自然发展情景延续了以往发展模式，建设用地面积增幅为18.29%。生态保护优先情景下，建设用地的扩张速度得到有效控制，增幅已经减缓，为4.73%。耕地保护优先情景下耕地面积比自然发展情景下多了171 km^2，耕地保护效果显著。（3）2000—2020年，碳储量呈下降趋势，共计减少8.5×10^6 t。2030年自然发展情景下碳储量总量相较于2020年减少了4.065×10^6 t，生态保护优先情景下比自然增长情景高7.519×10^5 t，耕地保护优先情景比自然增长情景低1.979×10^6 t。因此，在未来乌鲁木齐市发展规划中，应当落实耕地保护责任，控制建设用地向林地、草地等高碳密度用地的扩张，优化用地布局，提高区域碳储量水平。

关键词：碳储量；土地利用变化；PLUS模型；InVEST模型

全球气候变暖严重阻碍人类活动和社会经济的可持续发展[1]，气候变化问题日益受到国内外学者的广泛关注。随着城市化的快速发展，城市不断向外扩张，导致大量高碳密度土地的流失[2]，有研究表明，由于土地大规模开发导致的碳排放量约占全球碳排放总量的30%[3]。陆地生态系统在全球碳储量中扮演着重要角色，植被、土壤和其他生物质作为重要的碳库，通过自身的吸收、固化来减少大气中的二氧化碳含量，对区域气候调节以及缓解全球气候变暖具有重要作用[4]。因此，研究区域碳储量问题，厘清区域土地利用与碳储量变化的关系，对于优化土地利用结构、降低区域碳排放、实现双碳目标并指导地方政府制定平衡社会经济发展和生态环境保护的土地利用政策具有重要的理论和现实意义[5-6]。

目前国内外学者在区域碳储量评估方面已经取得丰富的研究成果。国外学者较早关注到土地利用对碳储量的影响，Anindita等[7]对印尼土地利用变化中土壤碳储量的影响进行研究，Islam等[8]研究孟加拉国东部沿海地区林外树木的开发对生态碳储量的影响，研究发现对于土地稀缺、人口稠密的南亚国家，林外树木是碳储量的重要来源，也是气候变化监管的重要选择。国内外学者主要使用实地调查法[9-11]和模型模拟的方法测算区域碳储量，学者们使用遥感数据结合CASA[12]、FORCCHN[13]、LPJ-GUESS[14]、DNDC[15]等模型测算了不同区域的碳储量，相比与其他模型，InVEST模型凭借在数据需求小、运算速度快、测算精度高以及能够实现碳储量空间分布和动态变化的可视化制图方面，具备显著优势，得到了广泛应用[16-21]。土地利用变化是影响区域碳储量的关键因素，越来越多的学者使用多种多样的模型来模拟、预估土地利用变化与碳储量的关系[22-23]，史名杰等[24]使用MCE-CA-Markov模型和InVEST模型预测土地利用变化对伊犁谷地碳储

收稿日期：2023-09-11； **修订日期**：2024-01-14
基金项目：新疆维吾尔自治区第三次全国国土调查成果专项《新疆耕地变化分析》（No.2020.(XY)158-2）
作者简介：李佳珂（1998-），男，硕士研究生，主要从事土地资源管理方面的研究. E-mail: jakelee2022@163.com
通讯作者：邵战林. E-mail: 944872210@qq.com

量的影响，李俊等[25]使用PLUS模型和InVEST模型预测自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景下昆明市土地利用变化与碳储量的关系。PLUS模型能够有效挖掘土地利用变化的驱动机理[26]，对于土地利用变化的预测更为准确，目前在土地利用变化和碳储量研究方面的应用还相对较少。

本文以西北干旱区绿洲城市乌鲁木齐市为例，通过土地利用数据和社会经济、气候等驱动因素数据分析了2000—2020年乌鲁木齐市土地利用的变化特征，以此预测模拟2030年自然发展情景、生态保护优先情景和耕地保护优先情景下土地碳储量。以期为乌鲁木齐市优化土地利用结构、实现双碳目标、制定平衡经济发展与生态环境保护的土地利用政策提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市是新疆经济、政治、文化中心(图1)。下辖7个区，1个县，总面积为1.38×10⁴ km²。截止2021年，常住人口4.07×10⁶人，其中城镇人口3.91×10⁶人，城镇化率96.1%，城市建成区面积536.2 km²。地势起伏，山地面积较大，占总面积的50%以上，而北部冲积平原仅占总面积的不到10%。该地区属温带大陆性干旱气候，降水稀少，气温年内波动较大、日温差较大。内陆河流分散短小，起源于山区，主要靠冰雪融水补给为主。森林资源相对较优，有林业用地面积62477 hm²。

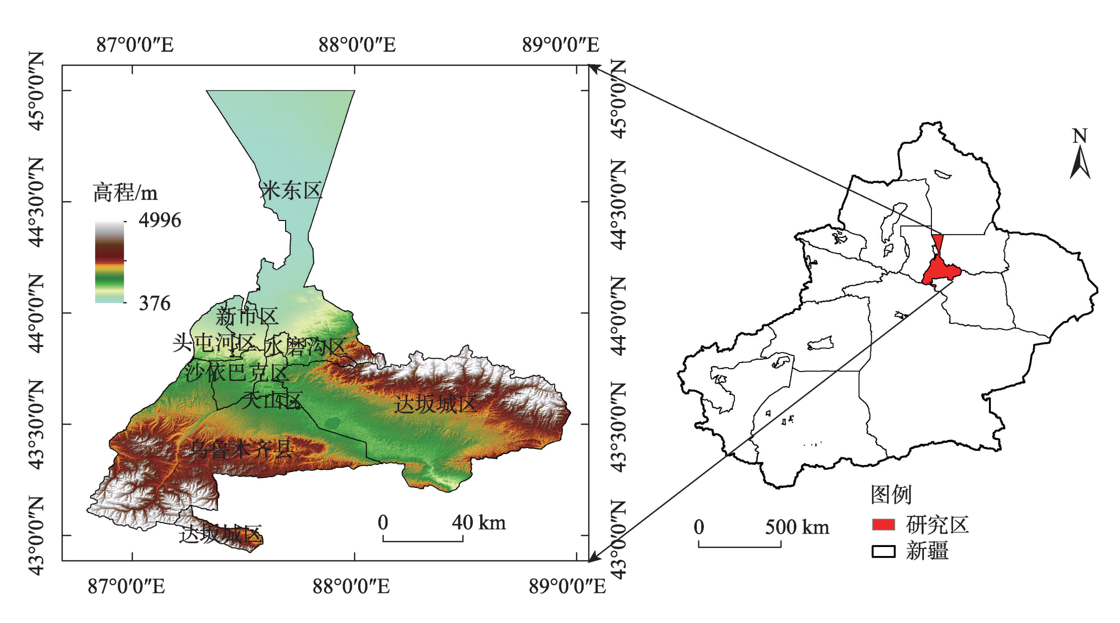
1.2 数据来源

2000年、2010年和2020年的土地利用数据来源于武汉大学土地利用数据CLCD(China Land Cover Dataset)，根据乌鲁木齐市实际情况，重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地，分辨率为30 m×30 m，其他各类数据来源如表1所示，所有数据的处理，均转换至GCS_WGS_1984。

1.3 研究方法

本文构建了以PLUS模型和InVEST模型为主的研究框架。首先，为了实现在不同情景下受到社会经济和生态约束的土地利用情景的最大化目标，运用Markov模型[27]及情景设置[28-29]模拟出自然发展、生态保护、耕地保护情景的土地利用斑块数量。其次，应用PLUS模型进行土地利用的空间布局优化，通过合理分配预测的土地利用数量，同时也考虑土地利用发展中的空间发展和限制政策。最后，应用InVEST模型估算区域的碳储量，分析碳储量变化特征，为区域土地利用规划提供参考依据。

1.3.1 PLUS模型 PLUS模型全称斑块生成土地利用变化模拟软件，是一个用于模拟土地利用变化的计算机模型，可以预测不同政策和发展情景下土地利用的可能变化。其是将地理信息系统(GIS)技术与土地利用模型相结合，以模拟和预测土地利用的



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)1822号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区地理位置概况

Fig. 1 Overview of the geographical location of the study area

表1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据名称	分辨率/m	数据来源
土地利用数据	30	武汉大学土地利用数据CLCD
DEM数据	30	地理空间数据云
坡度	30	ArcGIS软件计算生成
年均降水	1000	
年均气温	1000	中国科学院资源环境数据中心（https://www.resdc.cn/）
人口数据	1000	
GDP数据	1000	

变化，通常基于一些假设、参数和数据，然后运用一定的算法来模拟未来可能的土地利用变化[30]。

1.3.2 土地利用情景设置 影响城市未来发展和土地利用变化的因素较多，因此在模拟和预测城市土地利用变化时，必须充分考虑各种环境因素，本研究以乌鲁木齐市国土空间总体规划（2021—2035年）为总体指导性文件，提出了乌鲁木齐市自然发展情景、生态保护优先情景、耕地保护优先情景，并利用ArcGIS对乌鲁木齐市2030年乌鲁木齐市土地利用格局进行模拟和预测。

（1）自然发展情景。自然发展情景不考虑任何规划政策对土地利用变化的约束性影响，依据2000—2020年土地利用转移矩阵结合马尔可夫模型得出的变化率作为自然发展情景下未来土地模拟的参考。

（2）生态保护优先情景。在生态保护优先情景下，生态保护优先于经济发展，按照生态功能区划和主体功能区划的要求，从空间尺度上考虑乌鲁木齐市区域生态一体化建设，参照自然发展情景，将耕地与建设用地之间的转移概率降低40%，草地和林地向建设用地的转移概率降低30%，最终得到生态保护优先情景下2030年土地利用需求。

（3）耕地保护优先情景。在耕地保护优先情景下，着重关注粮食安全问题，致力于耕地保护，参照自然发展情景，降低耕地向建设用地的转移概率60%，增加草地向耕地的转移概率60%，增加林地和未利用地向耕地的转移概率40%，以此来保障耕地面积，最终得到耕地保护优先情景下2030年土地利用需求。

1.3.3 邻域权重设置 邻域权重是用来表示不同用地类型之间的转化概率。取值介于[0，1]之间，值越大表示扩张能力越强，反之，则表示扩张能力越弱，邻域权重参数见表2。

表2 不同发展情景下不同土地利用类型的邻域权重

Tab. 2 Neighbourhood weights for different land use types under different development scenarios

发展情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展	0.118	0.034	0.138	0.013	0.348	0.349
生态保护	0.193	0.043	0.077	0.015	0.264	0.408
耕地保护	0.217	0.034	0.136	0.013	0.249	0.351

1.3.4 InVEST模型碳储量模块 InVEST模型[31]旨在权衡土地利用与生态系统服务功能之间的联系，碳储量板块汇总了4个碳库中的碳储量，包括地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳和死亡有机碳。采用合适的碳密度数据是此模型的关键，参考及修正后的碳密度数据[24]如表3所示。

表3 不同土地利用类型碳密度

Tab. 3 Carbon intensity of different land use types

/(mg·hm^{-2})

土地利用类型	地上生物碳	地下生物碳	土壤有机碳	死亡有机碳
耕地	5.44	2.57	123.83	1.24
林地	37.36	15.60	300.70	3.05
草地	8.58	7.24	205.22	0.36
水域	0.93	0.66	82.20	1.23
建设用地	3.29	2.11	78.20	0.00
未利用地	0.57	0.98	56.50	0.00

2 结果与分析

2.1 2000—2020年乌鲁木齐市土地利用时空演变

乌鲁木齐市土地利用类型以草地和未利用地居多（图2），建设用地和耕地主要位于中西部，是主要的人口活动区域，面临着较大的生态压力。其他地区主要由林地和草地组成，其中草地占据了较大的比例，土地利用转移矩阵如表4所示。2000年乌鲁木齐市用地类型占比依次为：草地（52.65%）、未利用地（34.92%）、耕地（6.50%）、林地（3.60%）、建设用地（1.73%）、水域（0.60%）。依据图3得出，随着建设用地的扩大，耕地面积显著减少；林地和水域变化较小；未利用地和建设用地表现出明显扩张态势。2000—2010年期间，由于国家城镇化、工业化趋势以及西部大开发等相关政策的影响，加之乌鲁木齐是一个明显以能源消费为导向的城市，其建设用地变化十分明显。建设用地的强烈扩张趋势表

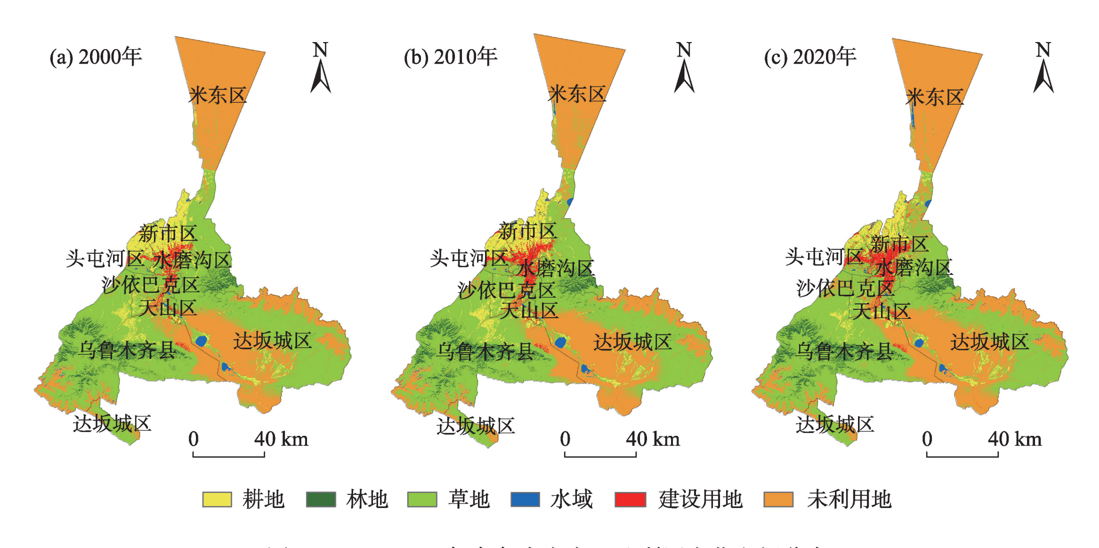


图2 2000—2020年乌鲁木齐市土地利用变化空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use change in Urumqi from 2000 to 2020

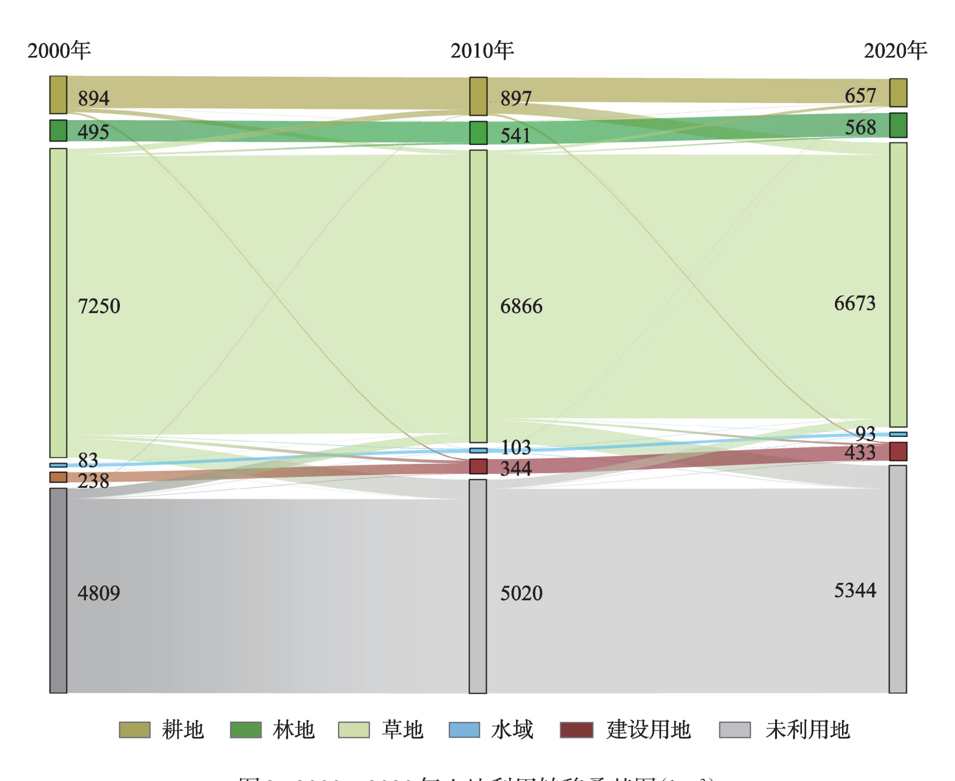


图3 2000—2020年土地利用转移桑基图(km²)

Fig. 3 Land use transfer sankey map 2000-2020

明,2000—2020年乌鲁木齐市正处于经济高速发展时期,城区迅速向周边地区扩张,建设用地面积增幅为81.49%,占用了大量耕地。

2.2 精度检验

使用PLUS模型基于2000年、2010年两期土地利用数据来对2020年土地利用状况进行预测,并对进行的结果检验了精度,最终得出Kappa系数为0.857,满足本文研究要求。

2.3 不同情景下土地利用空间变化分析

利用PLUS模型对2030年乌鲁木齐市土地利用格局进行模拟预测(图4),自然发展情景下,2020—2030年耕地面积减少了155 km^2,草地面积减少236 km^2,水域面积小幅减少,未利用地呈现出较大增幅,面积增加了294 km^2,林地面积略有增加。建设用地向耕地、草地扩张,面积增长了18.29%。生态保护优先情景下采取了保护林地、草地的措施,

表4　乌鲁木齐市2000—2020年土地利用转移矩阵

Tab. 4　Urumqi City land use transfer matrix 2000–2020　　/km²

土地利用类型		2020年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总和
2000年	耕地	518	0.4	288.8	9.4	68.3	9.4	894.3
	林地	0.3	495.2	0.0	0.0	0.0	0.0	495.5
	草地	116.3	72.0	6191.8	17.8	113.2	739.2	7250.3
	水域	7.1	0.5	9.7	52.8	1.1	12.0	83.2
	建设用地	0.1	0.0	0.1	0.3	238.4	0.0	238.9
	未利用地	16.0	0.1	183.3	13.1	12.4	4584.1	4809
	总和	657.8	568.2	6673.7	93.4	433.4	5344.7	13771.2

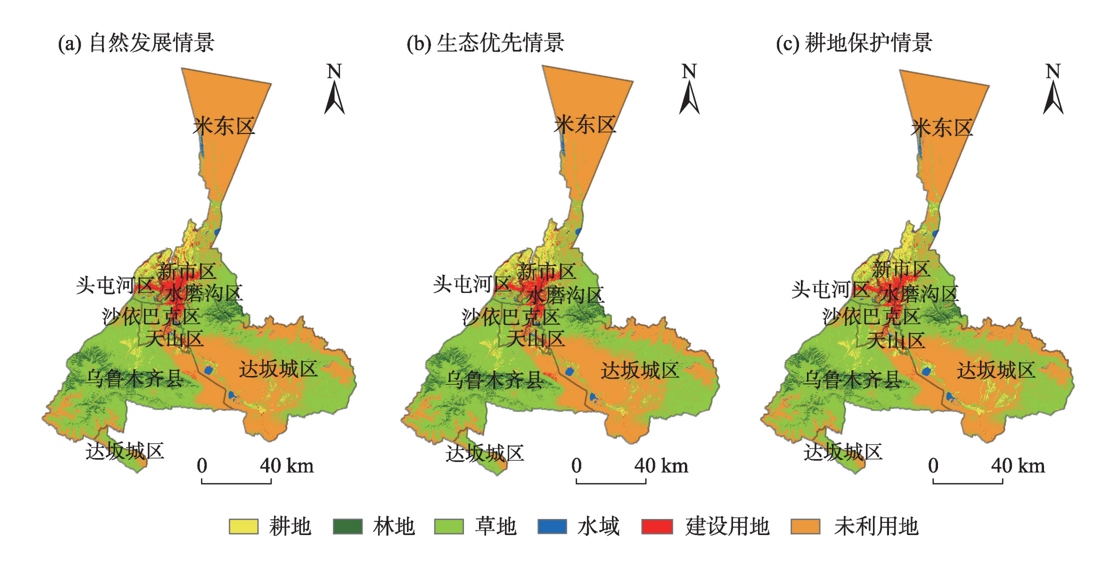


图4　2030年不同情景下的土地利用状况

Fig. 4　Land use under different scenarios in 2030

建设用地扩张受到了有效的限制，增幅得到了明显的减缓，为4.73%。耕地面积减少了146 km²。未利用地大幅增加，面积增加了295 km²。该情景下由乌鲁木齐市十四五规划可知，乌鲁木齐市采取了加强生态系统建设与保护的措施，保护和建设森林生态系统，推进天然林资源保护制度建设，完善公益林生态补偿机制。所以，生态保护优先情景预测的水域面积比自然增长情景多了1 km²，林地面积增加了3 km²，草地面积增加了46 km²。耕地保护优先情景下由于耕地保护措施的实施，耕地面积得到了有效的保护，效果显著。耕地面积的增加幅度为2.34%，比自然发展情景下多了171 km²，10 a年间，建设用地面积增加了12 km²，林地面积下降了45 km²，草地面积下降了296 km²，其中草地主要向耕地、建设用地和未利用地转移。

2.4　土地利用碳储量时空演变分析

2000年、2010年、2020年乌鲁木齐市总碳储量分别为2.207×10^8 t、2.161×10^8 t、2.122×10^8 t，总体呈下降趋势（图5），不同时期碳储量空间分布大致相同，总体呈现“西南高-东南低-北部低”的一高双低空间分布格局。20 a间共计减少了8.499×10^6 t，其中草地流失导致总碳储量损失了1.277×10^7 t，耕地流失导致总碳储量损失了3.149×10^6 t，林地、水域、建设用地、未利用地分别增加了2.594×10^6 t、8.564×10^4 t、1.628×10^6 t和3.110×10^6 t总碳储量。乌鲁木齐自2000年启动退耕还林工程以来，通过还林、荒山荒地造林、封育等方式，严格保护了森林固碳增加了碳储量，但也导致耕地碳储量大量流失，主要原因还是城市经济快速增长和土地荒漠化导致了草地面积的减少和未利用地、建设用地面积的增加。

通过预测2030年乌鲁木齐不同情景下各地类碳储量可知（表5），2020—2030年模拟预测的自然发展情景下的总碳储量减少4.065×10^6 t。生态保护优先情景下，2030年总碳储量比自然增长情景高7.519×10^5 t（图6）。其中草地提供了1.435×10^8 t，在

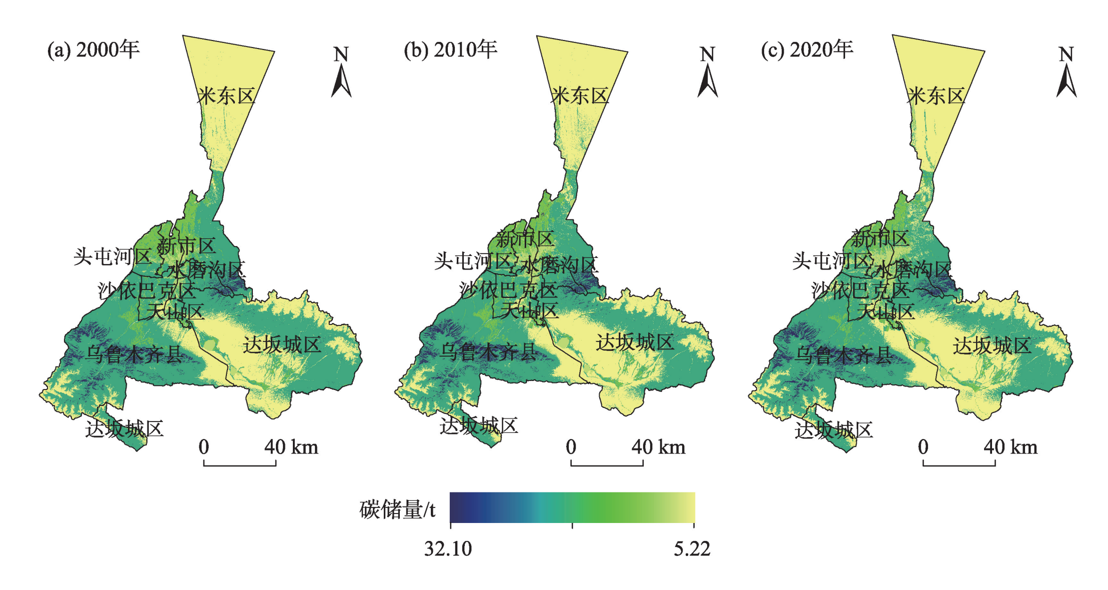


图5 2000年、2010年和2020年碳储量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon stocks in 2000, 2010 and 2020

各种土地利用类型中扮演着最重要的角色，是碳储量的主要供给来源。总而言之，生态保护措施的实施已经有了显著成效，减少了林地和草地的流失，从而保护了植被碳库，该情景下乌鲁木齐碳储量高于其他情景。耕地保护优先情景下，2030年总碳储量比自然增长情景低1.979×10^{6} t。其中耕地提供了8.961×10^{6} t，比自然发展情景高出2.277×10^{5} t。然而就碳储量而言，耕地的增多并不能完全弥补林地和草地减少导致的损失。相比于生态保护优先情景，林地减少了2.667×10^{6} t，草地减少了2.341×10^{6} t。虽然耕地保护情景保障了粮食安全，但也导致了一定的生态效益损失。

表5 不同土地利用类型碳储量

Tab.5 Carbon intensity of different land use types /10^{7} t

土地利用类型	自然发展情景	生态保护情景	耕地保护情景
耕地	0.67	0.68	0.90
林地	2.12	2.13	1.86
草地	14.25	14.35	14.12
水域	0.07	0.07	0.09
建设用地	0.43	0.38	0.37
未利用地	3.27	3.28	3.28
总碳储量	20.81	20.89	20.62

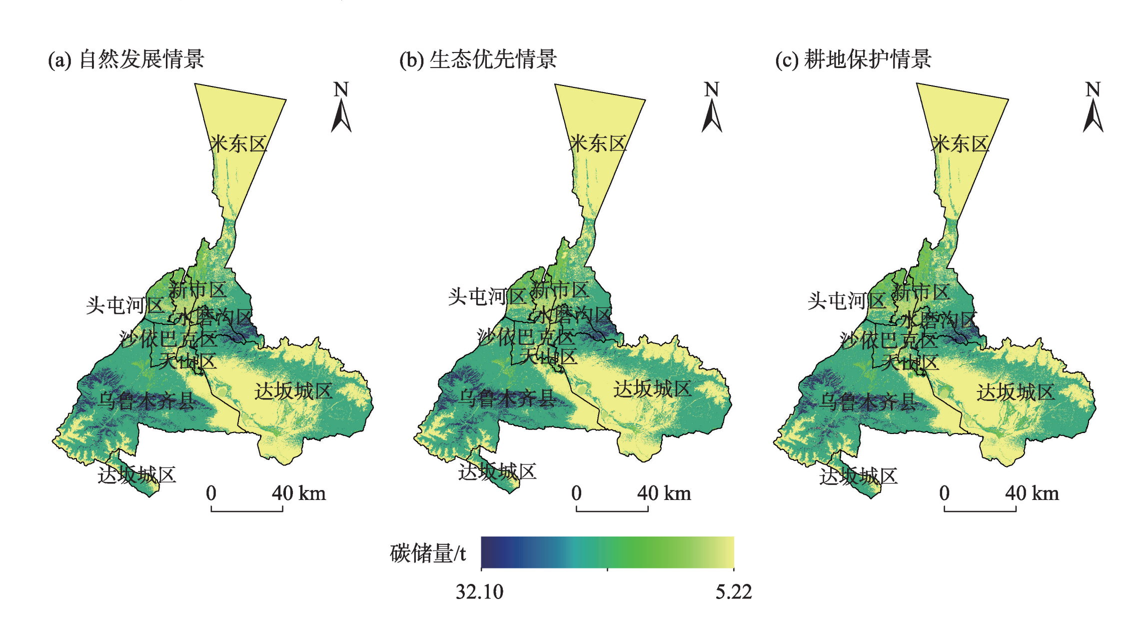


图6 2030年不同情景下的碳储量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of carbon stocks under different scenarios in 2030

3 讨论

本研究耦合了PLUS模型和InVEST模型，分别在土地利用预测和碳储量空间分配方面发挥了最大的作用，以定量评估预测不同发展情景下的土地利用变化情况及其对碳储量的影响，与陈宁等[29]对中国西北地区碳储量变化的研究得出一致的结论，即乌鲁木齐市2000—2020年碳储量整体呈下降趋势，预测自然发展情景下总碳储量也持续减少，说明本研究具有一定价值，可为区域碳储量评估的长远发展提供了更为系统、科学的研究方法。然而，这种方法有一些缺点，需要改进。当使用PLUS模型预测未来土地利用时，驱动因素的选择有限，社会经济因素方面，只考虑了人口、GDP，然而，社会经济因素是复杂的，还包括环境等因素，应尽可能多地对驱动因素的选择进行实验研究，以建立更完善的模型。此外，设定乌鲁木齐市2030年的三种发展情景与未来真实发展仍存在误差，无法精准判断所有的发展模式。

InVEST模型假设相同土地利用类型的碳密度均匀且恒定。然而，它随时间和环境而变化。在本研究中，碳密度值借助文献整理获取。由于不同地区研究者对碳密度的认知存在一定差异，估算结果可能存在不确定性。虽然这不会对结果产生太大的影响，但为了提高碳储量模拟的准确性，在未来的研究中，应通过实地调研对碳密度进行连续的现场监测，以期模型的评估结果更为准确。

土地利用变化对陆地生态系统的碳储量变化有着重要影响。在未来发展规划中，应当分区域进行低碳土地利用的调控，优化用地布局，提高区域碳储量水平。顺应垂直分层的自然地理格局，严格东部达坂城区和南部乌鲁木齐县的天山生态保护，加强北部米东区荒漠生态养育，稳步提高中部地区包括新市区、天山区、水磨沟区、沙依巴克区、头屯河区绿洲集聚开发区经济高质量发展，提升河湖湿地水生态功能，实施差异化的生态保护修复策略，加强绿洲生态空间的系统性、完整性，筑牢绿洲城市乌鲁木齐市的生态本底。总体而言，一是要加强土地利用规划，结合乌鲁木齐市的“十四五”规划和国土空间规划，建议在土地利用规划中明确生态保护和碳储量维护的重要性。确定生态敏感区域，限制对于高碳储量区域的过度开发，保护生态系统的完整性。二是促进可持续城市发展，政府可采取措施促进城市可持续发展，鼓励绿色建筑和低碳交通系统的建设，以减少城市对土地资源的过度利用，从而降低碳排放并保护碳储量。三是推动生态补偿机制，引入生态补偿机制，对于生态系统服务的损失给予相应的经济补偿。鼓励企业和发展项目在土地利用中采取生态友好的方式，通过生态补偿促使其对碳储量的保护和维护。四是加强监测和评估机制，建立健全的碳储量监测和评估机制，结合现代技术实时监测土地利用变化对碳储量的影响。这有助于及时调整政策，确保生态系统服务的可持续供给。

4 结论

本研究基于土地利用数据并结合PLUS和InVEST模型，通过多种驱动因素数据分析了2000—2020年乌鲁木齐市土地利用的变化特征，以此预测模拟2030年自然发展情景、生态保护优先情景和耕地保护优先情景下土地碳储量。研究得出以下结论：

（1）乌鲁木齐市2000—2020年土地利用类型以草地和未利用地居多，土地变化显著，林地、水域、建设面积、未利用地的数量增加，耕地和草地的面积减少。从转移方向上观察，主要是由耕地和草地转变为建设用地和未利用地。

（2）2030年，自然发展情景下，建设用地面积持续扩大，增幅为18.29%。生态保护优先情景下，建设用地的扩张速度得到有效控制，增幅减缓为4.73%，林地草地水域面积小幅增加。耕地保护优先情景下，耕地面积大幅度增加，耕地保护效果显著。

（3）土地利用变化对陆地生态系统的碳储量变化有着重要影响，2000—2020年，碳储量整体呈下降趋势，碳储量共计减少8.5×10^6 t。根据自然发展情景预测，到2030年，碳储量总量比2020年减少了4.065×10^6 t，这说明继续采用以前的发展模式将导致碳储量总量减少。生态保护优先情景下，2030年总碳储量比自然增长情景高7.519×10^5 t，生态保护情景限制了林地和草地的转化，植被碳库得到保存，得到了相当明显的生态效益。耕地保护优先情景下，2030年总碳储量比自然增长情景低1.979×

10^6 t,碳储量的损失主要为城市经济快速增长、土地荒漠化导致的高碳密度林地和草地面积大量减少,此情景虽然保障了粮食安全,但也造成了一定的生态效益损失。

综上所述,近年来乌鲁木齐市生态系统固碳能力处于减弱态势,碳储量缓慢减少。因此,要以《乌鲁木齐市国土空间总体规划(2021—2023年)》为契机,统筹山水林田湖草沙一体化系统治理,实施好生态的保护和修复,提高陆地生态系统碳储存增量,以提升区域碳储量水平。

参考文献(References):

[1] Udara Willhelm Abeydeera L H, Wadu Mesthrige J, Samarasinghalage T I. Global research on carbon emissions: A scientometric review[J]. Sustainability, 2019, 11(14): 3972.

[2] Willcock S, Phillips O L, Platts P J, et al. Land cover change and carbon emissions over 100 years in an A frican biodiversity hotspot [J]. Global Change Biology, 2016, 22(8): 2787-2800.

[3] Wang Z, Zeng J, Chen W. Impact of urban expansion on carbon storage under multi-scenario simulations in Wuhan, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(30): 45507-45526.

[4] 朱志强, 马晓双, 胡洪. 基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 222-229, 239. [Zhu Zhiqiang, Ma Xiaoshuang, Hu Hong. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou City by coupling FLUS-InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 222-229, 239.]

[5] 杨潋威, 赵娟, 朱家田, 等. 基于PLUS和InVEST模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 175-182. [Yang Nuanwei, Zhao Juan, Zhu Jiatian, et al. Spatial-temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi'an based on PLUS and InVEST models[J]. Remote Sensing of Natural Resources, 2022, 34(4): 175-182.]

[6] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(2): 300-314. [Luo Shuqi, Hu Xiaomeng, Sun Yuan, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled PLUS-InVEST model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 300-314.]

[7] Anindita S, Sleutel S, Vandenberghe D, et al. Land use impacts on weathering, soil properties, and carbon storage in wet Andosols, Indonesia[J]. Geoderma, 2022, 423: 115963.

[8] Islam I, Cui S, Hoque M Z, et al. Dynamics of tree outside forest land cover development and ecosystem carbon storage change in Eastern Coastal Zone, Bangladesh[J]. Land, 2022, 11(1): 76.

[9] 李忠佩, 王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 30-35. [Li Zhongpei, Wang Xiaoju. Simulation of soil organic carbon dynamic after changing land use pattern in hilly red soil region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(4): 30-35.]

[10] 杨玉姣, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2128-2136. [Yang Yujiao, Chen Yunming, Cao Yang. Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2128-2136.]

[11] Tang X, Zhao X, Bai Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4021-4026.

[12] 凌思源, 高子滢, 马闯, 等. 基于CASA模型的天津地区植被净初级生产力及植被碳汇量估测[J]. 天津农业科学, 2022, 28(12): 69-75, 81. [Ling Siyuan, Gao Ziying, Ma Chuang, et al. Estimation of net primary productivity of vegetation and vegetation carbon sink in Tianjin area based on CASA model[J]. Tianjin Agricultural Science, 2022, 28(12): 69-75, 81.]

[13] Zhao J, Xie H, Ma J, et al. Integrated remote sensing and model approach for impact assessment of future climate change on the carbon budget of global forest ecosystems[J]. Global and Planetary Change, 2021, 203: 103542.

[14] Lindeskog M, Smith B, Lagergren F, et al. Accounting for forest management in the estimation of forest carbon balance using the dynamic vegetation model LPJ-GUESS: Implementation and evaluation of simulations for Europe[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(10): 6071-6112.

[15] Singh P, Benbi D K. Modeling soil organic carbon with DNDC and RothC models in different wheat-based cropping systems in northwestern India[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51(9): 1184-1203.

[16] Nelson E, Sander H, Hawthorne P, et al. Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models. [J]. PLoS One, 2010, 5(12): 14327.

[17] Polasky S, Nelson E, Pennington D, et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of minnesota[J]. Environmental and Resource Economics, 2011, 48(2): 219-242.

[18] Zhang F, Zhan J, Zhang Q, et al. Impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 101: 195-203.

[19] Piyathilake I, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva Province, Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2213-2223.

[20] 朱丽亚, 胡克, 孙爽, 等. 基于InVEST模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 96-104. [Zhu Liya,

Hu Ke, Sun Shuang, et al. Research on the spatiotemporal variation of carbon storage in the coastal zone of Liaoning Province based on InVEST model[J]. Geoscienc, 2022, 36(1): 96-104.]

[21] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896-1906. [Lu Yayan, Xu Xiaoliang, Li Jicai, et al. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1896-1906.]

[22] 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 等. 基于CLUE-S和Markov复合模型的土地利用情景模拟研究——以江苏省环太湖地区为例[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 577-581. [Lu Rucheng, Huang Xianjin, Zuo Tianhui, et al. Land use scenarios simulation based on CLUE-S and Markov composite model—a case study of Taihu Lake Rim in Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 577-581.]

[23] Li J, Gong J, Guldmann J M, et al. Carbon dynamics in the northeastern qinghai-tibetan plateau from 1990 to 2030 using landsat land use/cover change data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 528.

[24] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019. [Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.]

[25] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 378-387. [Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 378-387.]

[26] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125-1136.]

[27] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(6): 1018-1029. [Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018-1029.]

[28] 韩敏, 徐长春, 隆云霞, 等. 西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 335-344. [Han Min, Xu Changchun, Long Yunxia, et al. Simulation and prediction of changes in carbon storage and carbon source/sink under different land use scenarios in arid region of Northwest China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 335-344.]

[29] 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 等. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 1-16. [Chen Ning, Xin Cunlin, Tang Daobin, et al. Multi-scenario land use optimization and carbon storage assessment in Northwest China[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 1-16.]

[30] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于InVEST模型和PLUS模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 1-12. [Ding Yue, Wang Liuzhu, Gui Feng, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay Area based on InVEST and PLUS models[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 1-12.]

[31] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065. [Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.]

Spatiotemporal evolution and prediction of carbon stock in Urumqi City based on PLUS and InVEST models

LI Jiake, SHAO Zhanlin

(College of Public Administration, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Land use changes have an important impact on carbon stock changes in terrestrial ecosystems, and studying carbon stock changes in terrestrial ecosystems under different development scenarios is conducive to the optimization of spatial layout and coordination of the relationship between land use and ecological environmental protection. In this study, the PLUS and InVEST models were combined, and the characteristics of land use changes in Urumqi from 2000 to 2020 were analyzed using data from multiple drivers to predict and simulate the land carbon stock under the natural development scenario, ecological protection priority scenario, and cropland protection priority scenario in 2030. Results show that from 2000 to 2020, the quantity of forest land, water area, construction area, and unused land increases, whereas the area of arable land and grassland decreases. In 2030, the natural development scenario continues the previous development pattern, and the increase in the area of construction land is 18.29%. Under the ecological protection priority scenario, the expansion rate of construction land is effectively controlled, and the increase has slowed down to 4.73%. The area of arable land under the priority arable land protection scenario is 171 km^2 more than under the natural development scenario, and the effect of cultivated land conservation is significant. From 2000 to 2020, and carbon stocks decrease by a total of 8.5×10^6 t. The total carbon stock in 2030 under the natural growth scenario decreases by 4.065×10^6 t compared to 2020. the ecological protection priority scenario is 7.519×10^5 t higher than the natural growth scenario. the cropland protection priority scenario is 1.979×10^6 t lower than the natural growth scenario.Therefore, in the future development plan of Urumqi City, the responsibility of protecting arable land should be implemented, and the expansion of construction land to high-carbon-density land such as forest land, grassland, and arable land should be controlled. Furthermore, the land use layout should be optimized to improve the level of regional carbon stock.

Keywords: carbon stocks; land use change; PLUS model; InVEST model